



TUGAS AKHIR - TE 141599

**ANALISIS KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK PADA
TEGANGAN RENDAH KARENA PENGARUH IMPEDANSI
SALURAN**

Riza Fakhroun Nisa'
NRP 2211100206

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**CHARACTERISTIC ANALYSIS OF ARC FLASH IN LOW
VOLTAGE ELECTRICAL POWER SYSTEM CAUSED BY
THE EFFECT OF LINE IMPEDANCE**

Riza Fakhroun Nisa'
NRP 2211100206

Advisor

Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTEMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2015

**ANALISIS KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK
PADA TEGANGAN RENDAH KARENA PENGARUH
IMPEDANSI SALURAN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik**

**Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Jurusan Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198109052005011002

Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.
NIP. 197007121998021001



ANALISIS KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK PADA TEGANGAN RENDAH KARENA PENGARUH IMPEDANSI SALURAN

Nama : Riza Fakhroun Nisa'
Pembimbing I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Pembimbing II : Dr.Eng . I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

ABSTRAK

Kebakaran yang disebabkan oleh hubung singkat semakin sering terjadi. Hal tersebut terjadi karena peralatan pengaman yang digunakan tidak mampu mendeteksi adanya gangguan listrik. Hubung singkat dapat memicu terjadinya fenomena busur api listrik. Busur api listrik terjadi karena adanya loncatan elektron pada dua konduktor dengan polaritas berbeda yang saling bersentuhan. Besarnya arus hubung singkat yang terjadi dipengaruhi oleh impedansi saluran. Salah satu faktor yang mempengaruhi besarnya impedansi saluran adalah luas penampang dari konduktor kabel yang digunakan. Untuk mengetahui karakteristik dari busur api listrik maka dilakukan simulasi *artificial short circuit* dengan menggunakan tiga jenis kabel yang luas penampang konduktor berbeda dan beban statis. Sehingga dapat diketahui karakteristik arus, daya, durasi, dan energi saat terjadi busur api listrik. Serta membandingkan karakteristik dari ketiga jenis kabel yang digunakan agar dapat diketahui pengaruh impedansi saluran terhadap karakteristik tersebut. Dari studi ini diketahui bahwa busur api memiliki arus yang lebih tinggi dari arus sistem yang bekerja normal, namun memiliki durasi yang sangat cepat. Impedansi saluran berpengaruh pada besar arus busur api yang terjadi. Semakin besar impedansi salurannya maka semakin kecil arus busur api yang dihasilkan.

Kata Kunci : Busur Api Listrik, Gangguan Listrik, Impedansi Saluran, Kabel.

Halaman ini sengaja dikosongkan

CHARACTERISTIC ANALYSIS OF ARC FLASH IN LOW VOLTAGE ELECTRICAL POWER CAUSED BY THE EFFECT OF LINE IMPEDANCE

Name : Riza Fakhroun Nisa'
1st Advisor : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
2nd Advisor : Dr.Eng . I Made Yulistya Negara, ST., M.Sc.

ABSTRACT

Fires caused by short circuits are becoming more frequent. This happens because the safety equipment that used is not capable to detect any electrical fault. Short circuit can lead to electrical arc flash phenomenon. Electrical arc flash occurs if the electrons jump on two conductors with different polarity which touching each other. The amount of short circuit current that occurs is influenced by line impedance. One of the factors that affect the magnitude of the impedance channel is diameter of the conductor cable. To know the characteristics of the electric arc, artificial short circuit is simulated using three types of cables with different conductor diameters and static load. So it could be known the characterizing of current, power, duration, and energy during an electrical arc. And compare the characteristics of the three types of cables are used in order to know the influence of the line impedance to the characteristic. From these studies it is known that the arc has a higher current than the current system, but has a duration which is very fast. Line impedance effect on the current of arc flash that occurs. The greater of line impedance value, the smaller of current arc flash occurs.

Key Words : *Cable, Electrical arc flash, Electrical fault, Line impedance.*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Besar Muhammad SAW, keluarga, dan sahabat serta kita semua selaku umatnya. Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir **“Analisis Karakteristik Busur Api Listrik pada Tegangan Rendah karena Pengaruh Impedansi Saluran”** ini tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dimas Anton Asfani dan Bapak I Made Yulistya Negara, atas segala pengetahuan dan waktunya dalam membimbing penulis sampai terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Kedua Orang tua penulis yang selalu memberikan nasehat, semangat, dan doa kepada penulis sehingga Tugas Akhir ini bisa terselesaikan tepat pada waktunya.
3. Kedua adik penulis yang selalu memberi motivasi kepada penulis selama mengerjakan Tugas Akhir
4. Bapak Daniar Fahmi dan Bapak Naryono, yang telah memberikan inspirasi dan membantu memberi solusi bagi penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
5. Seluruh Dosen, dan Staff Karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
6. Teman-teman Angkatan 2011 yang membantu penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir.
7. Teman-teman Laboratorium Tegangan Tinggi yang selalu memberi semangat, dukungan, hiburan serta mengingatkan penulis agar penulis bisa wisuda ke-112.
8. Yusrizal Afif, yang telah membantu dan memberi semangat sehingga Tugas Akhir ini dapat selesai tepat waktu.

Penulis berharap semoga Tugas Akhir ini bermanfaat dan berguna bagi penulis khususnya dan juga bagi para pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juni 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	
HALAMAN PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Sistematika Penulisan	2
 BAB 2 PENGARUH IMPEDANSI SALURAN TERHADAP KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK.....	 5
2.1 Instalasi.....	5
2.2 Kabel	5
2.3 Bahan Penghantar Kabel.....	6
2.4 Ukuran Konduktor	7
2.5 Tata Nama Kabel	8
2.6 Gangguan Listrik	11
2.7 Busur Api.....	12
2.8 Jenis Busur Api.....	13
 BAB 3 METODE DAN PENGUJIAN KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK.....	 15
3.1 Perancangan Alat Pengujian	15
3.1.1 Kabel.....	16
3.1.2 <i>Fuse</i>	17
3.1.3 Sumber AC.....	17
3.1.4 <i>Chamber</i>	17
3.1.5 Beban	18
3.1.6 <i>Current Transformer</i>	18

3.1.7 Probe Arus	18
3.1.8 Probe Tegangan	18
3.1.9 PXI dan <i>software</i> labVIEW	19
3.2 Metode Pengujian	19
3.3 Pengolahan Data	21
3.4 Perhitungan Konduktivitas	24
3.4.1 Hasil Perhitungan Konduktivitas	25
 BAB 4 HASIL PERCOBAAN DAN ANALISIS DATA	27
4.1 Peristiwa Busur Api	27
4.2 Bentuk Gelombang	27
4.2.1 Spike	27
4.2.2 Lebih Dari Satu Spike	28
4.2.3 Kontinyu	28
4.3 Analisa Hasil Pengujian	32
4.3.1 Nilai Rata-Rata Arus	32
4.3.2 Nilai Rata-Rata Daya	32
4.3.3 Nilai Rata-Rata Durasi	32
4.3.4 Nilai Rata-Rata Energi	33
 BAB 5 PENUTUP	39
5.1 Kesimpulan	39
5.2 Saran	40
 DAFTAR PUSTAKA	41
RIWAYAT HIDUP	43

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1	KHA terus menerus dan KHA proteksi yang diperbolehkan untuk kabel instalasi berinti tunggal berisolasi PVC pada suhu lingkungan 30 ⁰ C dan suhu konduktor maksimum 70 ⁰ C [6].....	8
Tabel 2.2	KHA terus menerus dan KHA proteksi yang diperbolehkan untuk kabel instalasi berisolasi dan berselubung PVC, serta kabel flexible dengan tegangan pengenalan 230/400 (300) volt dan 300/500 (400) volt pada suhu lingkungan 30 ⁰ C dan suhu konduktor maksimum 70 ⁰ C [6].....	9
Tabel 2.3	Tata nama kabel yang ada di Indonesia berdasarkan PUIL 2000 [6].....	9
Tabel 3.1	Kabel yang digunakan untuk pengambilan data.....	17
Tabel 3.2	Spesifikasi probe arus	18
Tabel 3.3	Spesifikasi probe tegangan	19
Tabel 3.4	Percobaan yang dilakukan tiap kasus	22
Tabel 3.5	Hasil perhitungan konduktivitas kabel	26
Tabel 4.1	Peak arus rata-rata saat terjadi busur api.....	34
Tabel 4.2	Daya rata-rata saat arus berada pada nilai peak	34
Tabel 4.3	Durasi rata-rata terjadinya busur api listrik	34
Tabel 4.4	Durasi rata-rata tanpa data <i>outlayer</i>	35
Tabel 4.5	Energi rata-rata busur api listrik	35
Tabel 4.6	Energi rata-rata tanpa data <i>outlayer</i>	35

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1	Konstruksi konduktor kabel, kabel berinti tunggal (a) dan kabel berinti serabut 6
Gambar 2.2	Bagian-bagian kabel..... 7
Gambar 2.3	Contoh kabel dengan konduktor tembaga (a) dan konduktor aluminium (b) 7
Gambar 2.4	Ilustrasi terjadinya seri <i>arc flash</i> [10]..... 13
Gambar 2.5	Ilustrasi terjadinya paralel <i>arc flash</i> [10]..... 14
Gambar 3.1	Diagram alur skema penelitian..... 15
Gambar 3.2	Skema peralatan pengujian 16
Gambar 3.3	Peralatan pengujian 20
Gambar 3.4	Contoh pilinan serabut konduktor kabel : (a) 1 serabut, (b) 3 serabut. 21
Gambar 3.5	Contoh pilinan serabut konduktor kabel : (a) 6 serabut, (b) 12 serabut..... 22
Gambar 3.6	Contoh pilinan serabut konduktor kabel : (a) 18 serabut, (b) 24 serabut..... 23
Gambar 3.7	Diagram alur proses pengolahan data. 24
Gambar 4.1	Busur api listrik saat pengujian, (a) sesaat sebelum terjadi busur api dan (b) saat terjadi busur api. 27
Gambar 4.2	Gelombang arus dan tegangan saat peristiwa busur api spike 29
Gambar 4.3	Gelombang daya saat peristiwa busur api spike 29
Gambar 4.4	Nilai energi terhadap waktu pada peristiwa busur api spike 29
Gambar 4.5	Gelombang arus dan tegangan saat peristiwa busur api spike lebih dari satu 30
Gambar 4.6	Gelombang daya saat peristiwa busur api spike lebih dari satu..... 30
Gambar 4.7	Nilai energi terhadap waktu pada peristiwa busur api spike lebih dari satu 30
Gambar 4.8	Gelombang arus dan tegangan saat peristiwa busur api kontinyu..... 31
Gambar 4.9	Gelombang daya saat peristiwa busur api kontinyu 31
Gambar 4.10	Nilai energi terhadap waktu pada peristiwa busur api kontinyu..... 31

Gambar 4.11	Peak arus rata-rata saat terjadi busur api	36
Gambar 4.12	Daya rata-rata saat arus berada pada nilai peak.....	36
Gambar 4.13	Durasi rata-rata terjadinya busur api listrik	36
Gambar 4.14	Durasi rata-rata tanpa data <i>outlayer</i>	37
Gambar 4.15	Energi rata-rata busur api listrik.....	37
Gambar 4.16	Energi rata-rata tanpa data <i>outlayer</i>	37

RIWAYAT HIDUP



Riza Fakhroun Nisa', lahir di Surabaya, 8 April 1993. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara pasangan Selamat Santoso dan Asmaniyah. Riwayat pendidikan penulis yaitu, SD Hang Tuah X, Juanda, (lulus 2005), lulus pendidikan SMP tahun 2008 di SMP Al-Falah, Deltasari. Tahun 2011 lulus dari SMAN 1 Sidoarjo. Kemudian melanjutkan pendidikan di Jurusan Teknik Elektro di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2011.

Selama kuliah, penulis aktif di organisasi pencinta alam KALPATARU dan Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HIMATEKTRO). Selain aktif di organisasi, penulis juga menjadi asisten di Laboratorium Tegangan Tinggi Elektro ITS. Penulis mengambil bidang studi Teknik Sistem Tenaga dan fokus pada riset mengenai busur api pada tegangan rendah. Penulis dapat dihubungi melalui email riza.fakhroun@gmail.com.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Akhir-akhir ini sering terdengar berita kebakaran, baik kebakaran yang terjadi pada rumah penduduk, pasar atau pusat perbelanjaan, maupun gedung bertingkat. Kebanyakan masalah kebakaran diakibatkan karena terjadinya hubung singkat atau biasa disebut sebagai konsleting listrik yang tidak dapat dideteksi oleh peralatan pengaman. Apabila terjadi kebakaran dan tidak segera ditangani maka bangunan yang berada didekatnya juga akan ikut terbakar. Akibat dari kebakaran tersebut dapat menimbulkan kerugian materil yang cukup besar dan bahaya bagi manusia. Tak jarang pula diberitakan bahwa peristiwa kebakaran yang terjadi menelan korban jiwa. Apabila terjadinya konsleting pada malam hari dan penghuni bangunan sedang tertidur lelap atau bangunan sedang kosong, tidak akan diketahui adanya asap sebagai indikator adanya api. Kejadian tersebut baru akan diketahui saat api mulai membesar. Sedangkan penghuni bangunan yang baru terbangun karena suhu panas kemungkinan besar tidak dapat menyelamatkan diri dari kobaran api yang sudah membesar disekelilingnya.

Hubung singkat dapat terjadi jika suatu bangunan memiliki instalasi listrik yang kurang baik seperti peletakan kabel yang tidak teratur, sambungan kabel yang tidak baik, peralatan yang tidak memenuhi standar, dan lain sebagainya. Selain itu, hubung singkat juga dapat terjadi apabila isolasi yang melindungi peralatan instalasi mengalami kerusakan baik karena peralatan yang sudah tua atau karena dimakan oleh binatang pengerat yang biasanya ada disekitar bangunan [1]. Busur api merupakan fenomena yang terjadi karena adanya loncatan elektron pada dua konduktor yang saling bersentuhan [2]. Peristiwa busur api memiliki arus gangguan yang bernilai cukup tinggi namun terjadi dengan durasi yang sangat cepat sehingga apabila terjadi gangguan tidak dapat terdeteksi oleh MCB (*mechanical circuit breaker*) dan *fuse* yang biasanya digunakan sebagai alat pengaman pada sistem tegangan rendah [1-5]. Dampak dari busur api tersebut dapat memicu terjadinya kebakaran apabila tidak segera terdeteksi.

Nilai impedansi saluran dipengaruhi oleh jenis inti dan diameter inti kabel yang digunakan [6]. Jenis inti kabel tersebut antara lain, kabel

berinti serabut dan berinti tunggal dengan luas penampang inti yang berbeda-beda. Panjang kabel yang digunakan juga berpengaruh pada nilai impedansinya. Semakin panjang kabel yang digunakan, semakin besar nilai impedansinya dan semakin kecil arus busur api yang ditimbulkannya.

Pada studi ini *artificial short circuit* disimulasikan untuk mendapatkan data berupa arus dan tegangan pada saat terjadi busur api. Pengujian akan dilakukan dengan menggunakan kabel berinti serabut dengan luas penampang inti yang berbeda. Data hasil percobaan selanjutnya akan dicari nilai daya, durasi, dan energinya untuk dianalisa. Sehingga dapat diketahui bagaimana karakteristik gelombang arus, daya, durasi dan energi busur api listrik yang terjadi.

Dari pemaparan tersebut, pada studi ini dapat dirumuskan beberapa masalah yang akan dibahas. Permasalahan pertama adalah bagaimana karakteristik arus, daya, durasi, dan energi saat terjadi busur api. Permasalahan kedua adalah apa pengaruh impedansi saluran pada karakteristik arus, daya, durasi, dan energi saat terjadi busur api.

Tujuan dari studi ini adalah untuk mengetahui karakteristik arus, daya, durasi, dan energi saat terjadi busur api dan mengetahui pengaruh dari impedansi saluran terhadap karakteristiknya dengan membandingkan data yang didapat saat mensimulasikan *artificial short circuit*. Diharapkan dengan adanya studi ini dapat menjadi referensi pembuatan suatu alat pendeteksi saat terjadi busur api agar dampak yang merugikan akibat peristiwa tersebut dapat diminimalisir.

1.2 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan dalam pembahasan yang akan dilakukan, Studi ini dibagi menjadi lima bab.

Bab pertama merupakan pendahuluan yang meliputi pembahasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika pembahasan, dan relevansi dari penulisan.

Bab kedua akan membahas tentang teori yang digunakan dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, yaitu instalasi, kabel, busur api.

Bab ketiga akan dibahas mengenai metodologi yang digunakan dalam pengerjaan studi ini. Antara lain, konsep pengujian yang digunakan dan peralatan yang digunakan dalam pengujian.

Bab keempat akan memaparkan hasil percobaan yang telah dilakukan dan menganalisis hasil percobaan tersebut sehingga dapat diketahui bagaimana karakteristik arus, daya, durasi, dan energi saat

terjadi busur api dan pengaruh dari impedansi saluran terhadap karakteristik tersebut.

Bab kelima berisi kesimpulan dari hasil analisa data yang didapat dari percobaan dan saran dari studi yang telah dilakukan.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II

PENGARUH IMPEDANSI SALURAN TERHADAP KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK

2.1 Instalasi

Jenis peralatan yang digunakan dalam instalasi listrik sangat banyak, sehingga dibutuhkan standarisasi agar peralatan instalasi yang digunakan dan pemasangan yang dilakukan aman bagi manusia maupun lingkungan dari bahaya yang dapat ditimbulkan oleh listrik. Komponen pokok dari instalasi listrik antara lain adalah penghantar (kabel/kawat), kotak kontak (stop kontak), fitting, saklar, pengaman dan pelindung [6].

Terdapat tiga syarat dari komponen instalasi yang akan dipasang. Syarat yang pertama adalah andal. Andal yang dimaksud adalah kelangsungan kerja dari komponen instalasi listrik pada kondisi kerja normal harus terjamin. Sehingga, instalasi yang telah terpasang harus dapat bekerja dengan baik kapanpun dibutuhkan. Syarat yang kedua adalah aman. Komponen instalasi yang dipasang harus dapat menjamin keamanan sistem instalasi listrik. Instalasi dapat dikatakan aman apabila pemilihan komponen dan pemasangan dilakukan sesuai standar. Syarat yang ketiga adalah kontinyu. Pada kondisi normal, komponen instalasi yang terpasang harus dapat bekerja secara terus menerus.

2.2 Kabel

Kabel merupakan komponen paling umum dan paling sering dijumpai pada instalasi sistem tegangan rendah. Kabel adalah konduktor yang dilapisi oleh bahan isolasi dan digunakan sebagai saluran untuk menghantarkan energi listrik dari sumber menuju beban. Semua jenis kabel pada dasarnya terdiri dari konduktor yang memiliki nilai resistansi rendah untuk melewatkan arus listrik dan isolasi untuk mengisolir antara suatu konduktor dengan konduktor lain dan daerah sekitarnya. Namun pada kasus tertentu dipilih konduktor dengan resistansi yang tinggi, seperti kabel untuk pemanas. Kabel yang digunakan pada tegangan yang cukup tinggi biasanya memiliki konstruksi yang lebih rumit [7].

Berdasarkan konstruksi dari konduktor kabel, kabel dibagi menjadi dua yaitu :

1. Kabel berinti serabut (konduktor flexible)
2. Kabel berinti tunggal (konduktor pejal)

Gambar 2.1 adalah contoh konstruksi konduktor kabel serabut dan pejal.

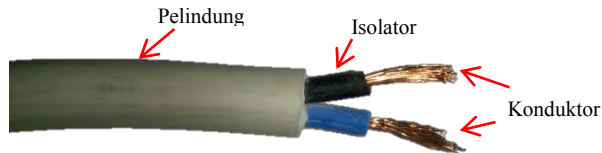
Secara umum terdapat tiga bagian utama pada konstruksi kabel yang biasa digunakan pada instalasi listrik. Bagian pertama dan merupakan bagian terpenting dari kabel adalah konduktor. Konduktor merupakan bagian penghantar yang digunakan sebagai media dalam menghantarkan listrik. Konduktor pada kabel biasanya terbuat dari alumunium atau tembaga. Konduktor kabel diselimuti dengan bagian isolator yang terbuat dari bahan dielektrik dan berfungsi untuk mengisolir bagian yang dialiri listrik dengan bagian lain yang dialiri listrik atau dengan lingkungan luar. Pada umumnya isolasi kabel terbuat dari bahan PVC (*Polyvinyl Chloride*) Bagian terluar merupakan bagian pelindung yang berfungsi untuk melindungi kabel dari pengaruh luar yang merugikan seperti bahan kimia, elektrolisis, api, tekanan mekanis dan lain sebagainya. Konstruksi kabel dapat dilihat pada Gambar 2.2.

2.3 Bahan Penghantar Kabel

Bahan penghantar kabel yang umum digunakan adalah tembaga dan alumunium. Perak merupakan bahan penghantar yang paling baik, namun karena harganya yang cukup mahal sehingga jarang digunakan. Tembaga dan aluminium mempunyai kekurangan dan kelebihan masing-masing saat digunakan sebagai bahan penghantar listrik. Tembaga sifat penghantarnya lebih baik dari alumunium dan mudah dibentuk, namun lebih berat dan lebih mahal dibandingkan alumunium. Sedangkan alumunium memiliki daya hantar lebih rendah jika dibandingkan dengan tembaga, namun beratnya lebih ringan. Untuk pengkabelan yang membutuhkan diameter yang besar lebih dipilih menggunakan bahan alumunium, terutama untuk saluran udara.



Gambar 2.1 Konstruksi konduktor kabel, kabel berinti tunggal (a) dan kabel berinti serabut (b)



Gambar 2.2 Bagian-bagian kabel



Gambar 2.3 Contoh kabel dengan konduktor tembaga (a) dan konduktor aluminium (b)

Material tembaga yang digunakan untuk bahan penghantar haruslah tembaga murni dengan tingkat kemurnian minimal 99,9% dengan tahanan jenis tidak melebihi $0,017241 \text{ ohm mm}^2/\text{m}$ pada suhu 20°C , atau setara dengan daya hantar 50 siemen = 100% IACS (*International Annealed Copper Standard*). Koefisien suhu awal 20°C adalah 4% per derajat celsius yang artinya, apabila terjadi kenaikan suhu sebesar 10°C maka akan terjadi kenaikan tahanan jenis sebesar 10% [7].

Alumunium yang digunakan sebagai material penghantar juga harus merupakan alumunium murni dengan tingkat kemurnian minimal 99,9%. Tahanan jenis alumunium yang digunakan untuk penghantar tidak boleh lebih dari $0,028264 \text{ ohm mm}^2/\text{m}$ pada suhu 20°C [7]. Contoh material inti kabel dapat dilihat pada Gambar 2.3.

2.4 Ukuran Konduktor

Pemilih ukuran konduktor kabel harus mempertimbangkan nilai KHA (Kemampuan Hantar Arus) [8]. KHA adalah arus maksimum yang dapat dialirkan dengan kontinyu oleh penghantar pada keadaan tertentu tanpa menimbulkan kenaikan suhu yang melampaui nilai tertentu (PUIL 2000 (Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000)) [6]. Nominal arus yang dialirkan pada kabel tidak boleh melebihi nilai KHAny agar tidak menimbulkan panas berlebih yang dapat merusak isolasi kabel tersebut

[8]. KHA terus menerus dan KHA pengaman yang diijinkan oleh PUIL 2000 dapat dilihat pada Tabel 2.1 dan Tabel 2.2.

Tabel 2.1 KHA terus menerus dan KHA proteksi yang diperbolehkan untuk kabel instalasi berinti tunggal berisolasi PVC pada suhu lingkungan 30°C dan suhu konduktor maksimum 70°C [6]

Jenis Penghantar	Luas Penampang Nominal (mm ²)	KHA terus menerus		KHA pengenal gawai proteksi	
		Pemasangan dalam pipa (A)	Pemasangan di udara (A)	Pemasangan dalam pipa (A)	Pemasangan di udara (A)
NYFA NYFAF NYFAZ NYFAD NYA NYAF NYFAw NYFAFw NYFAZw NYFADw dan NYL	0,5	2,5	-	2	-
	0,75	7	15	4	10
	1	11	19	6	10
	1,5	15	24	10	20
	2,5	20	32	16	25
	4	25	42	20	35
	6	33	54	25	50
	10	45	73	35	63
	16	61	98	50	80
	25	83	129	63	100
	35	103	158	80	125
	50	132	198	100	160
	70	165	245	125	200
	95	197	292	160	250
	120	235	344	250	315
	150	-	391	-	315
	185	-	448	-	400
	240	-	585	-	400
	300	-	608	-	500
	400	-	726	-	630
	500	-	830	-	630

2.5 Tata Nama Kabel

Kabel yang digunakan pada instalasi ada berbagai jenis. Untuk memudahkan dalam menyampaikan informasi mengenai kabel tersebut,

maka dibuatlah tata nama. Menurut PUIL 2000, tata nama kabel yang beredar di Indonesia terdapat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.2 KHA terus menerus dan KHA proteksi yang diperbolehkan untuk kabel instalasi berisolasi dan berselubung PVC, serta kabel flexible dengan tegangan pengenalan 230/400 (300) volt dan 300/500 (400) volt pada suhu lingkungan 30°C dan suhu konduktor maksimum 70°C [6]

Jenis Kabel	Luas Penampang (mm ²)	KHA terus menerus (A)	KHA pengenalan gawai proteksi (A)
NYIF NYIFY NYPLY _w NYM/NYM-O NYRAMZ NYRUZY NYRUZY _r NHYRUZY NHYRUZY _r NYBUY NYLRZY, dan kabel fleksibel berisolasi PVC	1,5	18	10
	2,5	26	20
	4	34	25
	6	44	35
	10	61	50
	16	82	63
	25	108	80
	35	135	100
	50	168	125
	70	207	160
	95	250	200
	120	292	250
	150	335	250
	185	382	315
	240	453	400
	300	504	400
	400	-	-
	500	-	-

Tabel 2.3 Tata nama kabel yang ada di Indonesia berdasarkan PUIL 2000 [6]

Symbol Huruf	Keterangan
A	Selubung atau lapisan pelindung luar bahan serat (<i>goni/jute</i>)
AA	Selubung atau perlindungan luar dua lapis dari bahan serat <i>goni (jute)</i>

Tabel 2.3 Tata nama kabel yang ada di Indonesia berdasarkan PUIL 2000 [6], lanjutan

Symbol Huruf	Keterangan
B	Perisai dari pita baja ganda
C	Penghantar konsentris tembaga
CE	Penghantar konsentris pada masing-masing inti, dalam hal kabel berinti banyak
CW	Penghantar konsentris pada masing-masing inti, yang dipasang secara berlawanan arah untuk kabel tegangan nominal 0,6/1kV (1,2kV)
D	Spiral anti tekanan Pita penguat non-magnetis
E	Kabel dengan masing-masing intinya berselubung logam
F	Perisai kawat baja pipih
G	Spiral dari kawat baja pipih
G	Isolasi karet/EPR
2G	Isolasi karet butyl dengan daya tahan lebih tinggi terhadap panas
Gb	Spiral pita baja (mengikuti F atau R)
H	Lapisan penghantar diatas isolasi, untuk membatasi medan listrik
K	Selubung timbal
KL	Selubung aluminium
KWK	Selubung dari pita tembaga yang terpasang dan dilas memanjang
L	Perisai dari jalinan kawat baja bulat (<i>braid</i>)
MK	Kabel dengan selubung timah hitam untuk pemasangan dalam kapal laut
N	Kabel standar penghantar tembaga
NA	Kabel standar penghantar aluminium
NF	Kabel udara berisolasi dipilin
NI	Kabel bertekanan gas
NO	Kabel bertekanan minyak
NP	Kabel dalam pipa bertekanan gas
O	Perisai terbuka dari kawat baja

Tabel 2.3 Tata nama kabel yang ada di Indonesia berdasarkan PUIL 2000 [6], lanjutan

Symbol Huruf	Keterangan
Q	Jalinan (<i>braid</i>) dari kawat-kawat baja berselubung-seng (<i>zing-coated</i>)
R	Perisai dari kawat-kawat baja bulat
RR	Dua lapisan perisai dari kawat-kawat baja bulat
S	Perisai dari tembaga, pelindung listrik dari pita tembaga yang dibalutkan pada semua inti kabel bersama-sama
SE	Pelindung listrik dari pita tembaga yang menyelubungi masing-masing inti kabel
T	Tali penggantung dari baja
2X	Selubung isolasi dari XLPE
Y	Selubung isolasi dari PVC
2Y	Selubung isolasi dari polyethylene
Z	Perisai dari kawat-kawat baja yang masing-masing mempunyai bentuk “Z” Penghantar berisolasi dengan beban tarik

2.6 Gangguan Listrik

Sebuah gangguan listrik dapat didefinisikan sebagai kondisi tidak normal yang disebabkan oleh kekuatan isolasi yang berkurang antara konduktor fasa yang dialiri listrik, atau antara konduktor fasa dan ground atau semua bagian yang diketanahkan dari sitem kelistrikan [5]. Kerusakan pada isolasi padat dapat disebabkan oleh tekanan mekanik yang terjadi pada isolasi, penuaan, dan juga karena adanya peristiwa korona. Apabila isolasi yang melindungi suatu bagian konduktor bertegangan rusak sehingga bagian tersebut menyentuh bagian konduktor lain dengan potensial yang berbeda dapat menyebabkan terjadinya *arc flash* [5].

2.7 Busur Api

Busur api (*arc flash*) adalah loncatan elektron yang terjadi saat dua permukaan konduktor (kawat, kontak, dll) berada saling berdekatan dan terjadi loncatan arus pada gap udara diantara kedua konduktor yang memiliki beda potensial. Elektron tersebut akan mengionisasi udara disekitarnya, sehingga menjadi bersifat konduktif, dan terjadilah fenomena *arc flash* [2]. Gangguan semacam itu tidak memiliki cukup arus atau durasi yang terlalu pendek untuk dideteksi oleh peralatan pengaman yang biasa digunakan pada sistem tegangan rendah dan dapat berpotensi munculnya api. Saat *arc flash* terjadi, fenomena tersebut akan menghasilkan panas hingga mampu menaikkan suhu cukup tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa suhu yang dihasilkan dapat mencapai angka dua ribu hingga empat ribu derajat selsius hanya dengan arus arc sebesar dua hingga sepuluh amper [1]. MCB hanya dapat mendeteksi gangguan seperti arus sisa, arus hubung singkat dan arus lebih namun tidak dapat melindungi dari gangguan *arc flash* [9]. Baik pada industri maupun pada perumahan, *arc flash* dapat menyebabkan kebakaran dan kerusakan pada peralatan [5].

Penyebab terjadinya *arc flash* sangat banyak, namun yang umum terjadi adalah *arc flash* yang disebabkan oleh kerusakan isolasi saluran. Banyak penyebab terjadinya kerusakan isolasi pada kabel, diantaranya terjadi karena terkarbonisasi dan dimakan hewan pengerat. Selain itu, udara yang terionisasi juga dapat menyebabkan terjadinya *arc flash*. Udara dapat terionisasi karena percikan atau *arc flash* yang terjadi sebelumnya. Hubung singkat juga dapat menyebabkan terjadinya fenomena *arc flash* [2]. Saat terjadi hubung singkat, terjadi loncatan elektron pada dua konduktor dengan potensial yang berbeda sehingga dapat muncul fenomena *arc flash*.

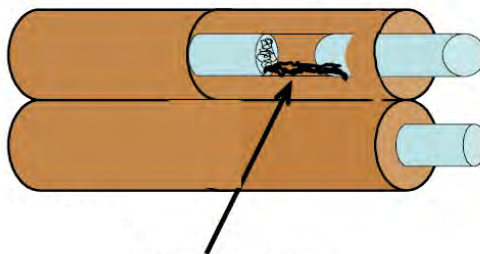
Fenomena yang sama juga terjadi pada sistem dengan tegangan distribusi yang mengalami kerusakan pada saluran atau konduktor yang jantuh hingga menyentuh tanah. Sudah banyak penelitian yang mengamati fenomena tersebut dan menghasilkan peralatan pengaman yang mampu mendeteksi fenomena tersebut pada level tegangan distribusi. Namun, untuk sistem tegangan rendah, fenomena tersebut dianggap tidak berdampak besar jika dibandingkan apabila terjadi pada level tegangan distribusi sehingga diabaikan [5].

2.8 Jenis Busur api

Banyak penyebab dan kondisi yang memungkinkan terjadinya *arc flash*. Namun, pada umumnya arcing dibagi menjadi 2 kategori yaitu:

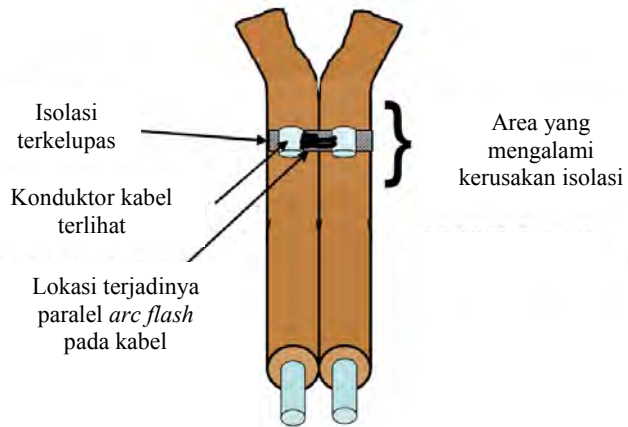
1. *Non-contact arcing*, merupakan arcing yang tidak memerlukan kontak secara langsung diantara dua konduktor dimana *arc flash* terjadi.
2. *Contact arcing*, merupakan arcing yang terjadi karena kontak langsung antara kedua konduktor atau elektroda dimana *arc flash* terjadi [2].

Arc flash (busur api) dapat terjadi karena salah satu dari dua kondisi, seri *arc flash* atau parallel *arc flash*. Seri *arc flash* dapat terjadi saat satu kabel yang terhubung seri dengan beban mengalami kerusakan konduktor dan locatan arus terjadi pada konduktor yang sama. Kerusakan konduktor dapat terjadi karena tekanan mekanik yang cukup besar dibebankan pada kabel. Ilustrasi terjadinya seri *arc flash* pada kabel yang mengalami kerusakan konduktor dapat dilihat pada Gambar 2.4. Paralel *arc flash* terjadi saat dua konduktor yang berbeda polaritas mengalami kerusakan isolasi, seperti konduktor fasa dan netral, dan bersentuhan atau terjadi loncatan arus diantaranya [2,4]. Pada Gambar 2.5, dapat dilihat ilustrasi terjadinya paralel *arc flash* pada kabel yang mengalami kerusakan isolasi. Jika saat terjadi *arc flash* nilai impedansi dari saluran cukup tinggi, maka arus gangguan yang ditimbulkan tidak memiliki nilai yang cukup tinggi atau memiliki durasi yang cukup lama untuk membut peralatan pengaman yang ada bekerja.



Lokasi terjadinya seri *arc flash* pada kabel

Gambar 2.4 Ilustrasi terjadinya seri *arc flash* [10]

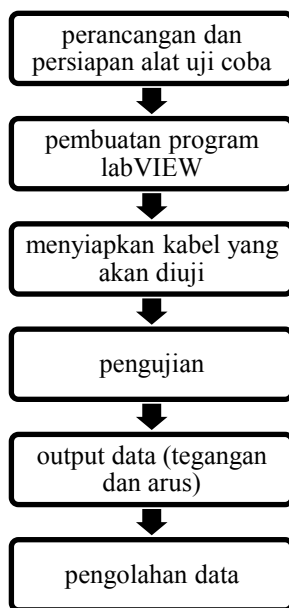


Gambar 2.5 Ilustrasi terjadinya paralel *arc flash* [10]

BAB III

METODE DAN PENGUJIAN KARAKTERISTIK BUSUR API LISTRIK

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah dengan melakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik arus dan energi pada saat terjadi busur api listrik. Skema penelitian yang akan digunakan dapat dilihat pada diagram alur Gambar 3.1.



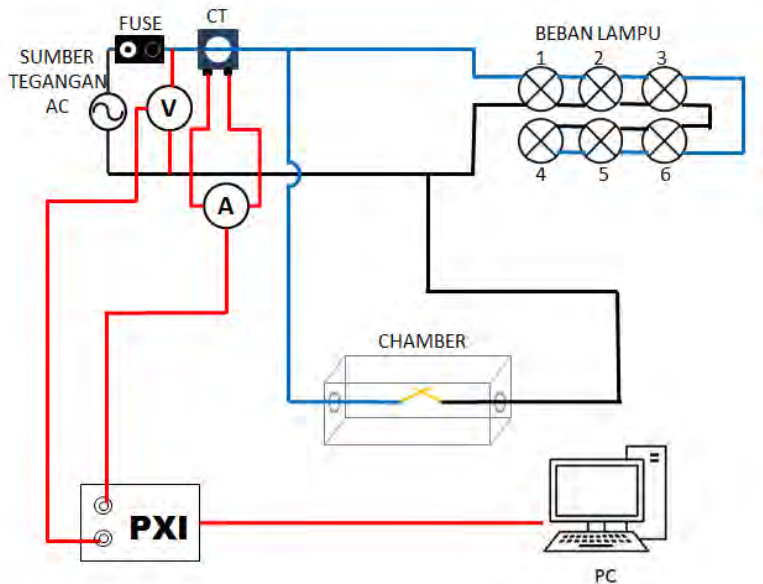
Gambar 3.1 Diagram alur skema penelitian

3.1 Perancangan Alat Pengujian

Dalam melakukan pengujian pada studi ini, dilakukan perancangan alat yang meliputi perancangan *hardware* dan perancangan *software*. Skema peralatan pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.2. Peralatan yang digunakan pada pengujian adalah kabel, *fuse*, sumber ac 1 fasa 220V, *chamber*, beban, *current transformer*, probe arus, probe tegangan, PXI, dan PC. *Software* yang digunakan adalah labVIEW sebagai *human interface* untuk proses pengambilan data saat melakukan pengujian.

3.1.1 Kabel

Pada studi ini digunakan 3 jenis kabel dengan diameter inti yang berbeda. Ketiga jenis kabel tersebut merupakan kabel serabut yang dijual di toko elektronik dan banyak digunakan pada instalasi rumah. Kabel yang digunakan memiliki tiga ukuran inti yang berbeda yaitu 0,75mm, 1,5mm, dan 2,5mm. Untuk kabel 0,75mm digunakan kabel NYMHY 2x0,75mm² sedangkan untuk kabel yang berukuran inti 1,5mm² menggunakan NYMHY 2x1,5mm² dan untuk kabel yang memiliki ukuran inti 2,5mm² menggunakan NYMHY 2x2,5mm². Tabel 3.1 adalah kabel yang digunakan untuk pengujian pada studi ini. Kabel yang digunakan untuk pengujian ini sepanjang 20 meter.


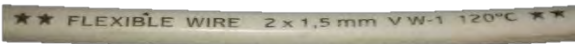
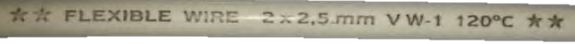


Gambar 3.2 Skema peralatan pengujian

3.1.2 Fuse

Fuse digunakan untuk mengamankan peralatan saat melakukan pengujian. Selain itu juga digunakan untuk mengetahui apakah saat terjadi busur api *fuse* bekerja atau tidak. *Fuse* yang digunakan adalah *fuse* dengan kapasitas 6A. Dipilih *fuse* dengan rating 6A karena *fuse* tersebut biasa digunakan pada instalasi listrik tegangan rendah sebagai alat pengaman dan banyak dijual dipasaran.

Tabel 3.1 Kabel yang digunakan untuk pengambilan data.

Nama Kabel	Contoh
longteng flexible cable NYMHY 2x0,75mm ² (2x24x0.20mm)	
NYMHY flexible wire 2x1,5mm 120 ⁰ C	
NYMHY flexible wire 2x2,5mm 120 ⁰ C	

3.1.3 Sumber AC

Pengujian ini mensimulasikan bagaimana terjadinya busur api pada instalasi tegangan rendah, sehingga sumber yang digunakan disesuaikan dengan sumber pada instalasi tegangan rendah. Sumber yang digunakan adalah sumber dari PLN sebesar 220 volt AC dengan frekuensi 50Hz. Sumber yang digunakan berasal dari stop kontak yang berada pada laboratorium tegangan tinggi.

3.1.4 Chamber

Untuk mengamankan percikan busur api yang timbul saat dilakukannya percobaan maka digunakan *chamber*. *Chamber* yang digunakan berukuran panjang 30cm, lebar 15cm, tinggi 20cm dan terbuat dari bahan akrilik dengan ketebalan 3mm. Pengujian busur api

dilakukan didalam *chamber* sehingga apabila muncul busur api tidak mengenai dan membahayakan saat dilakukan pengamatan.

3.1.5 Beban

Beban yang digunakan adalah beban statis sebesar 600watt yang terdiri dari enam buah lampu pijar yang masing-masing memiliki daya 100watt. Lampu-lampu tersebut dihubungkan secara seri. Beban menggunakan lampu pijar karena lampu pijar adalah salah satu jenis beban resistif murni yang tidak menimbulkan harmonisa.

3.1.6 Current Transformer

Karena peak arus yang akan disampling dikhawatirkan melebihi rating peak dari peralatan yang digunakan dan peak maksimum dari probe arus hanya mampu hingga arus peak 100A maka digunakan *current transformer* agar tidak terjadi kerusakan pada probe yang digunakan. *Current transformer* yang digunakan memiliki perbandingan belitan 200/5A.

3.1.7 Probe Arus

Sampling arus dilakukan dengan menggunakan probe arus yang terhubung dengan PXI. Spesifikasi dari probe arus yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.2. Probe arus bekerja saat ada perintah dari PXI untuk melakukan sampling dan data yang didapat dikirim ke PXI yang akan dilanjutkan ke PC, sehingga data dapat diolah.

Tabel 3.2 Spesifikasi probe arus

Maximum Input Current	100 A peak
Bandwidth	DC to 100 kHz
Output	10mV/A, 100mV/A
Maximum Conductor Diameter	11,8 mm (0,46 in.)
Termination	BNC
Maximum Bare Wire Voltage	600 V (CAT III)
Operating Temperature	0 ⁰ C to 50 ⁰ C
Humidity	0 ⁰ C to 40 ⁰ C, 95% humidity 40 ⁰ C to 50 ⁰ C, 45% humidity

3.1.8 Probe Tegangan

Selain arus, tegangan saat terjadi busur api juga disampling. Untuk menyampling tegangan digunakan probe tegangan. Spesifikasi dari

probe tegangan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.3. Cara kerja dari probe tegangan tidak jauh berbeda dari probe arus, hanya saja yang disampling adalah nilai tegangan ketika terjadi busur api.

Tabel 3.3 Spesifikasi probe tegangan

Attenuation	x100
Input Impedance	100 M Ω , 4 pF
Bandwidth	300 MHz
Rise Time	1,2 ns
Cable Length	1,2 m
Compensation Range	10...50 pF
Maximum Input Voltage	1500Vp, DC incl Peak AC (derating with frequency)

3.1.9 PXI dan *software* labVIEW

Pxi dan *software* labVIEW digunakan pada proses akuisisi data. Tipe PXI yang digunakan adalah NI PXIe-1073 dan NI PXIe-5122. PXI ini mampu mensampling sinyal arus dan tegangan hingga satu juta sampling perdetik. *Software* labVIEW digunakan sebagai *human interface* untuk memerintahkan PXI agar bekerja.

3.2 Metode Pengujian

Setelah mempersiapkan peralatan yang akan diuji, maka peralatan tersebut dirangkai sesuai dengan skema peralatan pengujian yang telah direncanakan. Sebelum masuk kebeban, kabel yang dipasang pada sumber diberi *fuse* untuk mengetahui saat gangguan busur api terjadi, *fuse* tersebut bekerja atau tidak. Selain itu, *fuse* digunakan untuk mengamankan apabila terjadi gangguan yang membahayakan dan untuk saklar sumber. Gambar dari peralatan yang sudah dirangkai sesuai dengan skema dapat dilihat pada Gambar 3.3.

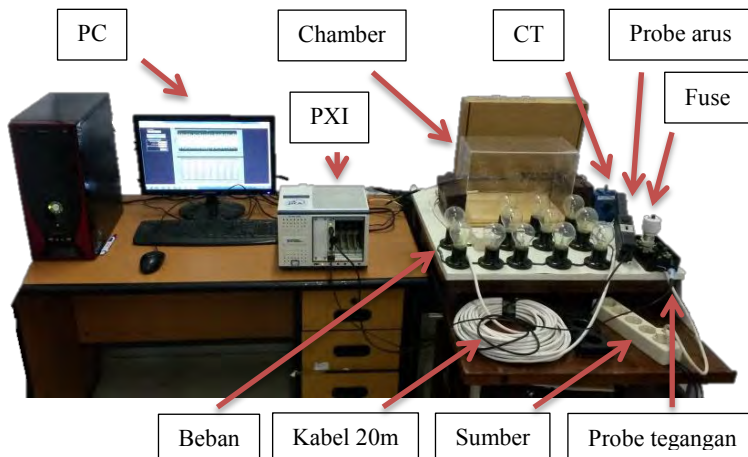
Kabel dengan panjang 20m dipasang secara paralel terhadap beban dengan ujung lainnya dikupas isolatornya agar dapat dihubungkan dengan kabel lain dengan panjang yang sudah ditentukan. Kemudian ujung dari kabel yang tersambung dengan kabel 20m dikupas ujungnya agar konduktor kabel tidak terbungkus dengan isolator. Serabut konduktor yang terlihat dari kabel dipilin sesuai dengan yang diinginkan kemudian dimasukkan kedalam *chamber*.

Current transformer dipasang pada kabel fasa dengan cara memasukkan kabel kedalam lubang yang ada pada *current transformer*.

Probe arus diletakkan pada sisi sekunder dari current transformer. Sedangkan probe tegangan dipasang secara parallel pada sumber. Kedua probe tersebut dikoneksikan pada PXI.

Saklar di on kan sehingga sumber dapat menyuplai beban dan lampu bias menyala. Kemudian kabel yang berada di dalam camber yang telah dikupas dan dipilin dihubung singkatkan agar terjadi fenomena busur api. PXI melalui probe arus dan tegangan yang terpasang melalui *software* labVIEW sebagai *human interface*, dapat menampilkan bentuk gelombang dan merekam nilai arus dan tegangan selama terjadi fenomena busur api dan menyimpannya.

Percobaan dilakukan dengan jumlah serabut terpilin yang berbeda yaitu 1 serabut, 3 serabut, 6 serabut, 12 serabut, 18 serabut, dan 24 serabut. Hal tersebut diterapkan pada ketiga jenis kabel yang diuji. Contoh dari pilinan serabut konduktor kabel yang digunakan saat pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.4, Gambar 3.5, dan Gambar 3.6. Pengujian dilakukan sebanyak 30 kali setiap kasusnya. Sehingga untuk ketiga jenis kabel, total pengujian yang dilakukan sebanyak 540 kali. Pada Tabel 3.4 menunjukkan jenis kasus yang diuji dan banyaknya pengujian yang dilakukan.



Gambar 3.3 Peralatan pengujian

Data yang didapat dari pengujian yang dilakukan berupa nilai gelombang arus dan tegangan. Data tersebut selanjutnya diolah dan dianalisa untuk mengetahui karakteristik saat terjadi gangguan listrik yang menghasilkan busur api.

3.3 Pengolahan Data

Bagan pada Gambar 3.7 memperlihatkan proses pengolahan data yang dilakukan pada data arus dan tegangan yang diperoleh dari pengujian.

Setelah dipotong, data akan difilter menggunakan lowpass filter untuk mengurangi noise yang ada pada sampling gelombang yang didapat. Noise yang terjadi bukan karena beban yang menimbulkan noise, tapi dari *current transformer* yang digunakan untuk pengambilan data.

Proses pemotongan dilakukan lagi pada sinyal arus dan tegangan setelah difilter. Pemotongan yang kedua ini dilakukan untuk mengambil sinyal saat *arcing* saja. Hal tersebut dilakukan untuk mencari data durasi dan energi pada masing-masing percobaan yang dilakukan.



Gambar 3.4 Contoh pilinan serabut konduktor kabel : (a) 1 serabut, (b) 3 serabut



Gambar 3.5 Contoh pilinan serabut konduktor kabel : (a) 6 serabut, (b) 12 serabut

Tabel 3.4 Percobaan yang dilakukan tiap kasus

Luas penampang konduktor kabel	Jumlah serabut	Banyak percobaan
0,75mm ²	1	30
	3	
	6	
	12	
	18	
	24	
1,5mm ²	1	30
	3	
	6	
	12	
	18	
	24	

Tabel 3.4 Percobaan yang dilakukan tiap kasus, lanjutan

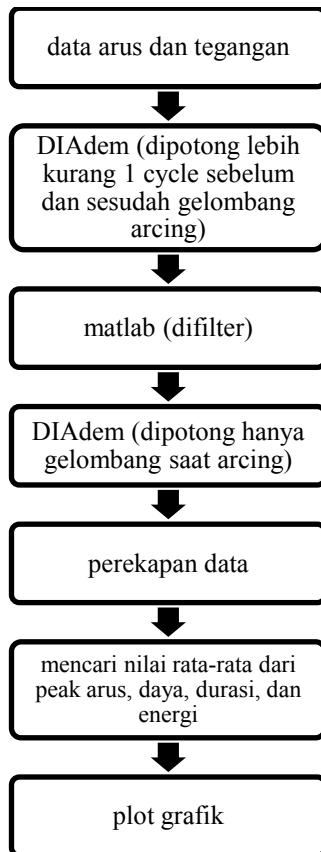
Luas penampang konduktor kabel	Jumlah serabut	Banyak percobaan
2,5mm ²	1	30
	3	
	6	
	12	
	18	
	24	



Gambar 3.6 Contoh pilinan serabut konduktor kabel : (a) 18 serabut, (b) 24 serabut

3.4 Perhitungan Konduktivitas

Konduktivitas listrik dapat didefinisikan sebagai kemampuan suatu material konduktor dalam menghantarkan arus listrik. Nilai dari konduktivitas suatu konduktor tergantung dari material yang digunakan dan tingkat kemurniannya. Konduktor yang baik adalah konduktor yang memiliki nilai konduktivitas yang tinggi dan nilai resistansi yang rendah.



Gambar 3.7 Diagram alur proses pengolahan data

Apabila diketahui nilai tegangan (V) dan arus (I) yang melewati suatu konduktor, maka untuk mencari nilai konduktivitas (σ) terlebih dahulu dicari nilai resistivitas dari konduktor tersebut.

$$R = \frac{V}{I} \quad (3.1)$$

$$\rho = A \times \frac{R}{l} \quad (3.2)$$

Nilai resistivitas (ρ) didapat dengan mengalikan luas penampang (A) dari konduktor dengan nilai resistansi (R) dan dibagi dengan panjang (l) konduktor tersebut. Sehingga nilai konduktivitasnya didapat dengan Persamaan 3.3.

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.3)$$

3.4.1 Hasil Perhitungan Konduktivitas

Hasil dari perhitungan resistivitas dan konduktivitas dari ketiga kabel yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.5. Dari hasil tersebut dapat terlihat bahwa nilai konduktivitas dari kabel dengan luas penampang $0,75\text{mm}^2$ paling besar jika dibandingkan dengan nilai konduktivitas kabel lainnya. Sedangkan nilai konduktivitas paling kecil dimiliki oleh kabel dengan luas penampang $1,5\text{mm}^2$ jika dibandingkan dengan kabel lain yang digunakan pada pengujian.

Tabel 3.5 Hasil perhitungan konduktivitas kabel

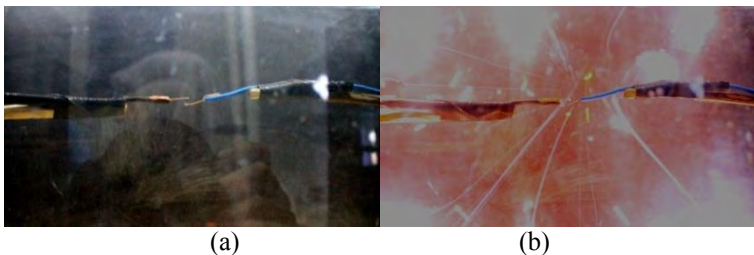
Kabel		Arus (A)	Tegangan (V)	Panjang (m)	A (mm ²)	A (m ²)	R (Ω)	Resistivity (Ω/m)	Conductivity (Ω ⁻¹ /m)	R 20m
0,75 mm ²	Dua Konduktor	10.1	0.21	1	1.5	1.5×10^{-6}	0.021	3.12×10^{-8}	32,063,492	0.416
	Biru	8.7	0.35	1	0.75	7.5×10^{-7}	0.040	3.02×10^{-8}	33,142,857	0.805
	Hitam	8.9	0.36	1	0.75	7.5×10^{-7}	0.040	3.03×10^{-8}	32,962,963	0.809
	1 Serabut	0.8	0.78	1	0.031	3.12×10^{-8}	0.975	3.05×10^{-8}	32,820,513	19.5
1,5mm ²	Dua Konduktor	8.4	0.33	1	3	3×10^{-6}	0.039	1.18×10^{-7}	8,484,848	0.786
	Biru	6.1	0.45	1	1.5	1.5×10^{-6}	0.074	1.11×10^{-7}	9,037,037	1.475
	Hitam	5.5	0.49	1	1.5	1.5×10^{-6}	0.089	1.34×10^{-7}	7,482,993	1.782
	1 Serabut	0.6	0.86	1	0.062	6.25×10^{-8}	1.433	8.96×10^{-8}	11,162,791	28.667
2,5mm ²	Dua Konduktor	9.6	0.32	1	5	5×10^{-6}	0.033	1.67×10^{-7}	6,000,000	0.667
	Biru	6.8	0.44	1	2.5	2.5×10^{-6}	0.065	1.62×10^{-7}	6,181,818	1.294
	Hitam	6.3	0.44	1	2.5	2.5×10^{-6}	0.07	1.75×10^{-7}	5,727,273	1.397
	1 Serabut	0.6	0.88	1	0.078	7.81×10^{-8}	1.467	1.15×10^{-7}	8,727,273	29.333

HASIL PERCOBAAN DAN ANALISIS DATA

Bab ini memaparkan hasil pengujian dan analisa hasil pengujian. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui karakteristik arus, daya, durasi, dan energi pada saat terjadi gangguan busur api listrik pada tegangan rendah.

4.1 Peristiwa Busur Api

Percobaan dilakukan untuk menghasilkan busur api listrik. Busur api listrik yang terjadi saat dilakukan percobaan dapat dilihat pada Gambar 4.1. Gambar tersebut adalah contoh pengujian busur api listrik pada kabel 0,75mm² serabut 3.



Gambar 4.1 Busur api listrik saat pengujian, (a) sesaat sebelum terjadi busur api dan (b) saat terjadi busur api

4.2 Bentuk Gelombang

Dalam subbab ini akan ditunjukkan berbagai macam bentuk gelombang arus dan tegangan busur api listrik yang didapat saat pengujian. Dari gelombang yang didapat tersebut akan ditunjukkan daya dan energinya.

4.2.1 Spike

Pristiwa busur api yang hanya terjadi kurang dari setengah cycle dinamakan spike. Peristiwa busur api spike dapat dilihat dari gelombang arus dan tegangannya yang mengalami perbedaan nilai dari gelombang saat sistem bekerja normal, dimana perbedaan nilai tersebut terjadi kurang dari setengah cycle. Hal tersebut terjadi karena konduktor yang saling bersentuhan meleleh dengan sangat cepat sehingga gangguan

hilang dengan cepat pula. Gangguan busur api seperti ini tidak dapat terdeteksi oleh peralatan pengaman yang diterapkan pada tegangan rendah walaupun arus gangguan bernilai cukup tinggi namun durasinya terlalu singkat untuk membuat peralatan pengaman bekerja. Bentuk dari gelombang arus dan tegangan spike dapat dilihat pada Gambar 4.2. Bentuk gelombang daya yang dihasilkan dari perkalian arus dan tegangannya dapat dilihat pada Gambar 4.3. Nilai energi yang didapat dari daya saat busur api spike ada pada Gambar 4.4.

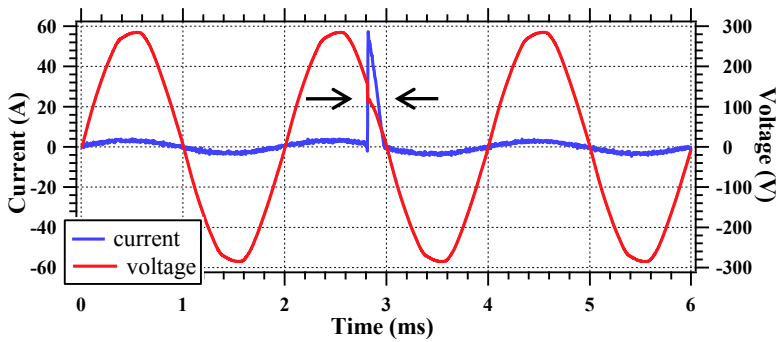
4.2.2 Lebih Dari Satu Spike

Peristiwa busur api listrik yang lebih dari satu spike maksudnya adalah peristiwa spike yang terjadi lebih dari satu kali dalam waktu yang berdekatan. Antara spike satu dengan yang lain terdapat gelombang arus normal. Peristiwa ini terjadi saat pengujian dengan serabut konduktor lebih dari satu. Serabut-serabut tersebut meleleh pada waktu yang tidak bersamaan karena proses menyentuhnya serabut-serabut juga tidak bersamaan. Sehingga terjadi fenomena busur api listrik lebih dari satu namun dalam waktu yang sangat singkat. Gambar 4.5 adalah contoh bentuk gelombang arus dan tegangan dari peristiwa busur api lebih dari satu spike. Perkalian dari arus dan tegangannya dapat dilihat pada Gambar 4.6. Energi dari peristiwa busur api lebih dari satu spike dapat dilihat pada Gambar 4.7.

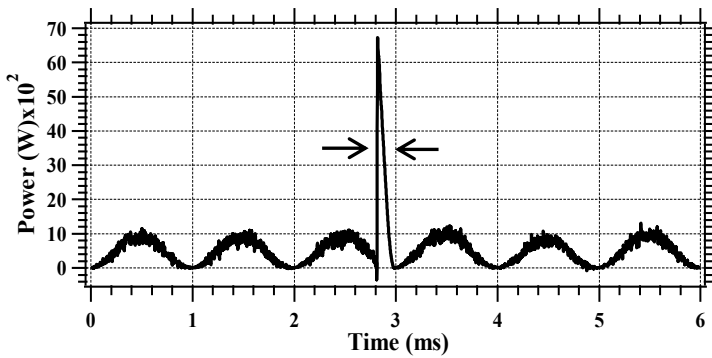
4.2.3 Kontinyu

Busur api listrik kontinyu adalah fenomena busur api yang diawali dengan *glowing* pada konduktor. *Glowing* terjadi karena adanya kenaikan suhu pada konduktor yang mengalami hubung singkat sehingga konduktor tersebut memerah. Karena konduktor tersebut tidak langsung meleleh maka terjadinya fenomena busur api didahului dengan *glowing*.

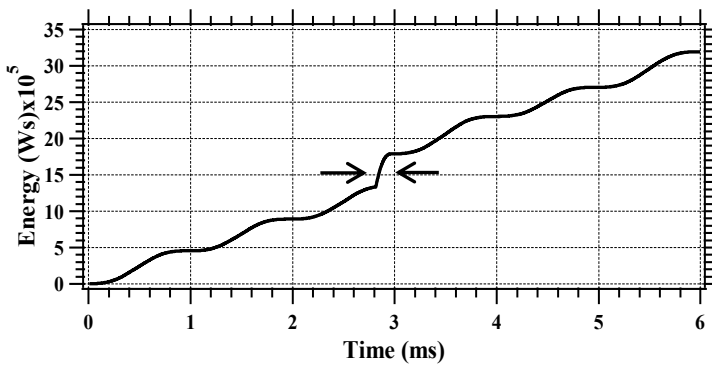
Fenomena busur api kontinyu dapat menyebabkan peralatan pengaman trip apabila durasinya cukup lama. Namun jika durasinya tidak cukup lama maka peralatan pengaman tidak mampu mendeteksi adanya gangguan. Contoh gelombang arus dan tegangan busur api kontinyu dapat dilihat pada Gambar 4.8. Bentuk gelombang daya dari fenomena ini dapat dilihat pada Gambar 4.9. Proses kenaikan energi yang terjadi pada saat busur api kontinyu dapat dilihat pada Gambar 4.10.



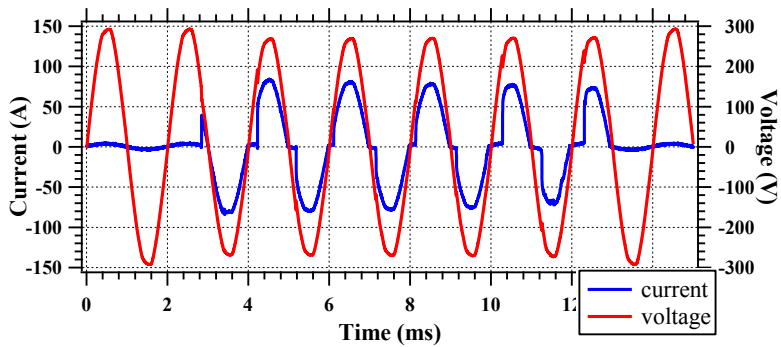
Gambar 4.2 Gelombang arus dan tegangan saat peristiwa busur api spike



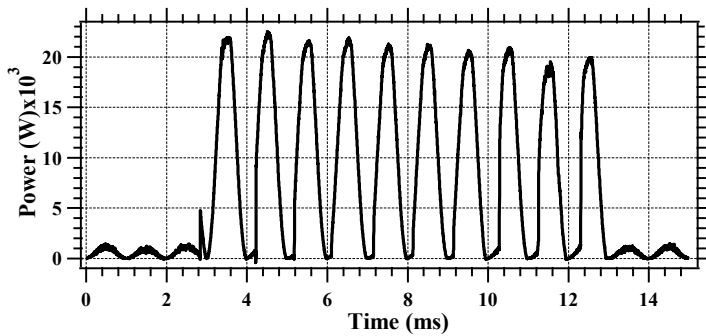
Gambar 4.3 Gelombang daya saat peristiwa busur api spike



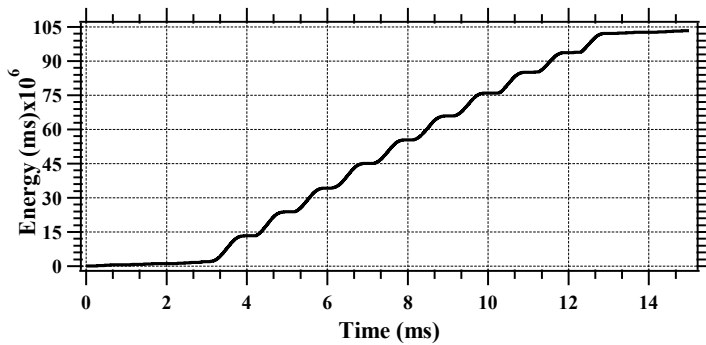
Gambar 4.4 Nilai energi terhadap waktu pada peristiwa busur api spike



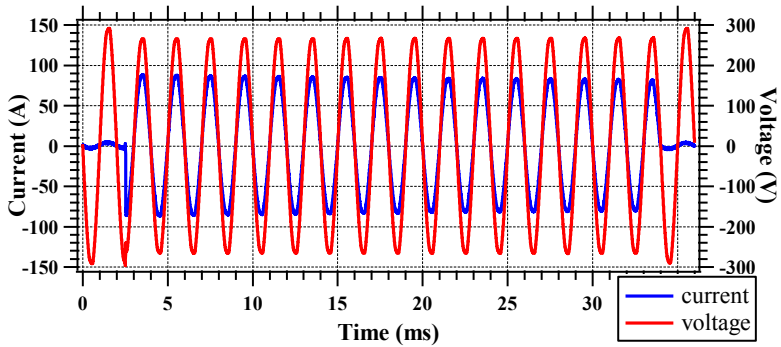
Gambar 4.5 Gelombang arus saat peristiwa busur api spike lebih dari satu



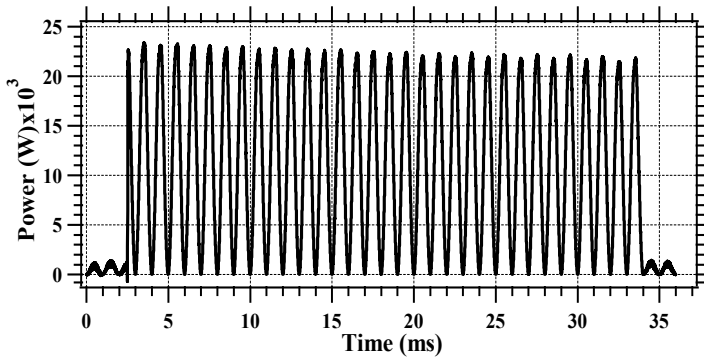
Gambar 4.6 Gelombang daya saat peristiwa busur api spike lebih dari satu



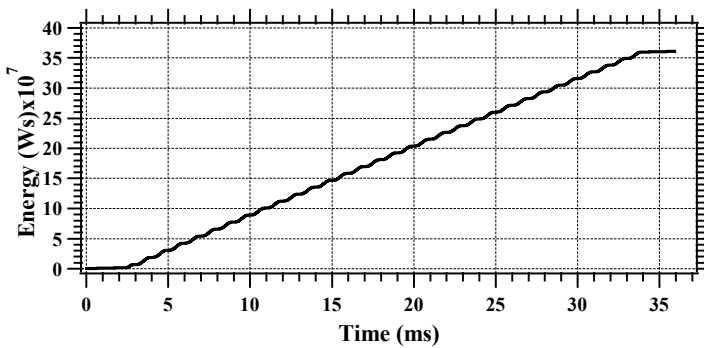
Gambar 4.7 Nilai energi terhadap waktu pada peristiwa busur api spike lebih dari satu



Gambar 4.8 Gelombang arus dan tegangan saat peristiwa busur api kontinyu



Gambar 4.9 Gelombang daya saat peristiwa busur api kontinyu



Gambar 4.10 Nilai energi terhadap waktu pada peristiwa busur api kontinyu

4.3 Analisa Hasil Pengujian

Dari pengujian yang telah dilakukan, didapatkan data berupa nilai tegangan dan arus. Dari data tersebut dapat diketahui durasi terjadinya busur api. Selain itu, nilai daya dan energinya dapat dicari.

4.3.1 Nilai Rata-rata arus

Hasil yang didapat untuk nilai arus pada masing masing serabut dan kabel yang diuji dapat dilihat pada Tabel 4.1. Nilai peak arus pada Tabel 4.1 merupakan nilai rata-rata dari 30 percobaan yang dilakukan pada masing-masing serabut dan kabel. Sedangkan Gambar 4.11 merupakan grafik yang dihasilkan dari nilai arus pada Tabel 4.1.

Dari grafik pada Gambar 4.11 dapat dilihat bahwa nilai peak arus pada saat terjadi gangguan busur api tergantung dari jenis kabel yang digunakan. Kabel 0.75mm^2 memiliki nilai peak arus yang paling tinggi karena memiliki nilai resistansi atau impedansi salurannya yang paling rendah. Sedangkan nilai peak arus pada kabel 1.5mm^2 paling rendah karena nilai resistansi atau nilai impedansi salurannya paling tinggi. Dapat disimpulkan bahwa nilai peak arus berbanding terbalik dari nilai impedansi salurannya.

4.3.2 Nilai Rata-Rata Daya

Rata-rata daya yang dimaksud adalah nilai rata-rata daya saat arus peak dari 30 pengujian. Tabel 4.2 adalah nilai dari rata-rata daya yang didapat dari pengujian yang dilakukan. Sedangkan Gambar 4.12 adalah grafik yang didapat dari nilai rata-rata daya pada Tabel 4.2.

Dari Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa nilai daya yang didapat sebanding dengan arus. Hal tersebut sesuai dengan persamaan untuk mencari daya. Dimana daya yang didapat adalah hasil perkalian arus dengan tegangannya.

4.3.3 Nilai Rata-Rata Durasi

Durasi terjadinya busur api listrik tergantung seberapa cepat konduktor yang mengalami hubung singkat meleleh. Semakin cepat konduktor meleleh maka durasi busur api listrik juga akan semakin cepat. Begitu juga sebaliknya, semakin lama konduktor meleleh maka semakin lama pula durasi terjadinya busur api. Tabel 4.3 menunjukkan nilai durasi rata-rata busur api pada saat pengujian. Grafik dari nilai tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.13.

Semakin banyak serabut konduktor yang mengalami hubung singkat maka semakin lama pula konduktor tersebut meleleh, sehingga durasi dari busur api listrik yang terjadi juga akan semakin lama. Hal tersebut sesuai dengan grafik pada gambar 4.13. semakin banyak serabut konduktor yang mengalami hubung singkat, maka durasinya semakin lama. Dapat disimpulkan bahwa jumlah serabut berbanding lurus dengan lama durasi terjadinya busur api listrik.

Karena ada dua data pada kabel 1.5mm^2 serabut 18 dan dua data pada kabel 1.5mm^2 serabut 24 dengan nilai yang jauh berbeda dibandingkan data lainnya sehingga mempengaruhi nilai rata-rata ketiga puluh data. Data kabel 1.5mm^2 serabut 18 yang dihilangkan bernilai 3200.38 dan 3116.21 sedangkan data lainnya memiliki nilai dibawah 3000. Untuk data kabel 1.5mm^2 serabut 24 yang dihilangkan bernilai 5531.35 dan 6298.19 sedangkan data lainnya memiliki nilai dibawah 3500. Apabila kedua data yang memiliki nilai jauh berbeda dengan data lainnya dihilangkan, maka nilai rata-rata durasi dapat dilihat pada Tabel 4.4. Bentuk grafik dari data rata-rata durasi setelah data dengan nilai yang besar dihilangkan dapat dilihat pada Gambar 4.14.

Dilihat dari Gambar 4.14, tren data setelah data *outlayer* dihilangkan tidak jauh berbeda dari sebelum data *outlayer* dihilangkan. Namun nilai pada serabut 24 jauh berbeda dari data sebelum nilai *outlayer* dihilangkan.

4.3.4 Nilai Rata-Rata Energi

Nilai energi yang didapat sebanding dengan nilai durasinya. Karena nilai energi didapatkan dari daya yang dikalikan dengan lama durasinya. Tabel 4.5 adalah nilai dari rata-rata energi yang didapat. Grafik dari nilai rata-rata energi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.15. Energi berbanding lurus dengan jumlah serabutnya. Semakin banyak jumlah serabutnya, maka semakin besar nilai energinya, begitu pula sebaliknya.

Karena pada data durasi terdapat data yang dihilangkan maka pada data energi juga terdapat data yang dihilangkan. Data energi yang dihilangkan sesuai dengan data durasi yang dihilangkan. Tabel 4.6 menunjukkan nilai rata-rata energi setelah data *outlayer* dihilangkan. Gambar 4.16 adalah grafik yang didapat dari Tabel 4.6. Dapat dilihat pada Gambar 4.16 nilai rata-rata energi pada serabut 24 jauh berbeda jika dibandingkan dengan grafik sebelum data *outlayer* dihilangkan.

Tabel 4.1 Peak arus rata-rata saat terjadi busur api

Peak Arus (A)			
Serabut Kabel	Diameter Kabel		
	0.75mm ²	1.5 mm ²	2.5 mm ²
1	103.39	66.67	75.14
3	105.41	68.87	79.29
6	126.23	74.74	86.72
12	128.99	81.01	89.16
18	128.69	80.92	91.91
24	132.86	82.88	90.70

Tabel 4.2 Daya rata-rata saat arus berada pada nilai peak

Peak Daya (watt)			
Serabut Kabel	Diameter Kabel		
	0.75 mm ²	1.5 mm ²	2.5 mm ²
1	23139.25	16488.26	19787.04
3	24261.26	17708.90	20749.33
6	31210.32	19212.54	22258.92
12	32505.17	21912.27	23117.14
18	32599.13	21383.09	24246.75
24	33972.78	21717.08	24018.96

Tabel 4.3 Durasi rata-rata terjadinya busur api listrik

Durasi (ms)			
Serabut Kabel	Diameter Kabel		
	0.75 mm ²	1.5 mm ²	2.5 mm ²
1	5.17	6.14	7.15
3	9.33	14.40	11.06
6	13.58	62.27	18.90
12	61.46	287.26	95.58
18	36.42	810.30	468.96
24	63.97	1193.74	524.56

Tabel 4.4 Durasi rata-rata tanpa data *outlayer*

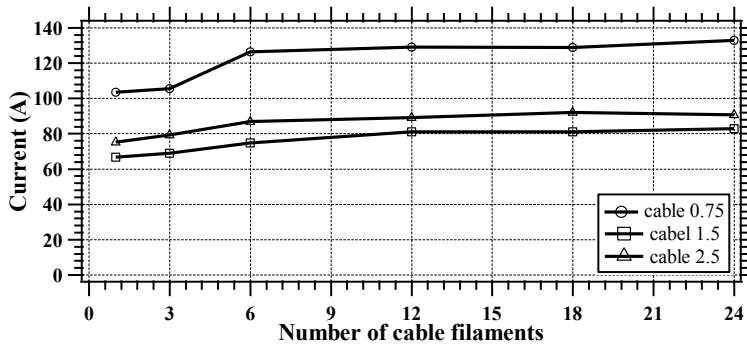
Durasi Tanpa Nilai Outlayer (ms)			
Serabut Kabel	Diameter Kabel		
	0.75 mm ²	1.5 mm ²	2.5 mm ²
1	5.17	6.14	7.15
3	9.33	14.40	11.06
6	13.58	62.27	18.90
12	61.46	287.26	95.58
18	36.42	642.59	468.96
24	63.97	856.52	524.56

Tabel 4.5 Energi rata-rata busur api listrik

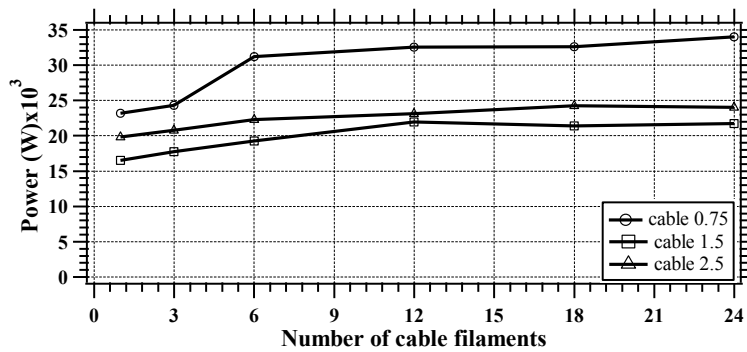
Energi (watt detik)			
Serabut Kabel	Diameter Kabel		
	0.75 mm ²	1.5 mm ²	2.5 mm ²
1	76.98	64.08	79.36
3	137.94	136.49	117.70
6	208.12	610.27	208.42
12	769.25	3127.57	1075.98
18	542.74	7700.72	5268.53
24	932.60	11142.07	5571.63

Tabel 4.6 Energi rata-rata tanpa data *outlayer*

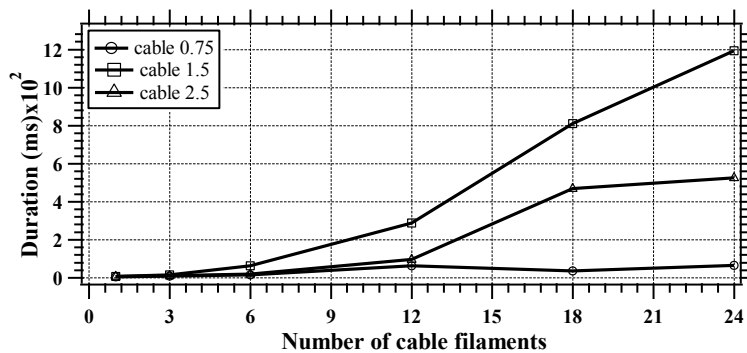
Energi Tanpa Data Outlayer (watt detik)			
Serabut Kabel	Diameter Kabel		
	0.75 mm ²	1.5 mm ²	2.5 mm ²
1	76.98	64.08	79.36
3	137.94	136.49	117.70
6	208.12	610.27	208.42
12	769.25	3127.57	1075.98
18	542.74	6256.06	5268.53
24	932.60	8220.76	5571.63



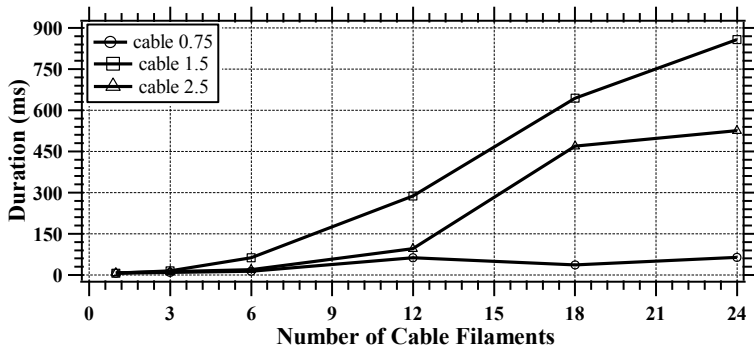
Gambar 4.11 Peak arus rata-rata saat terjadi busur api



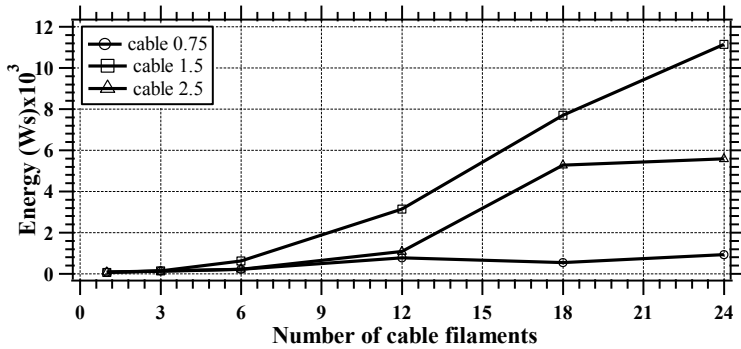
Gambar 4.12 Daya rata-rata saat arus berada pada nilai peak



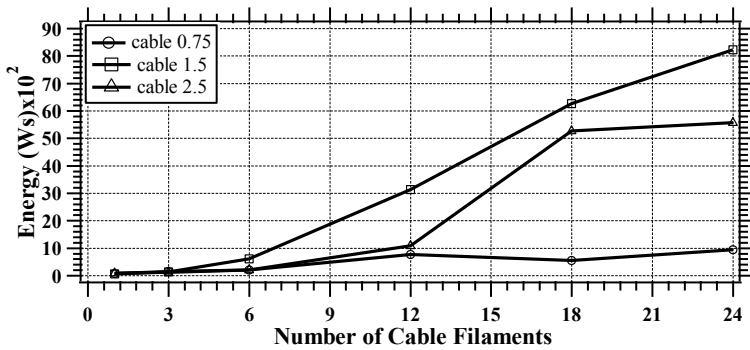
Gambar 4.13 Durasi rata-rata terjadinya busur api listrik



Gambar 4.14 Durasi rata-rata tanpa data *outlayer*



Gambar 4.15 Energi rata-rata busur api listrik



Gambar 4.16 Energi rata-rata tanpa data *outlayer*

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Yuan Wu, Zhengxiang Song and Xue Li, "*A Method for Arc Fault Detection Based on the Analysis of Signal's Characteristic Frequency Band with Wavelet Transform*", IEEE 2nd International Conference on Electric Power Equipment, Matsue, Japan, 2013.
- [2] Asit K Mishra, Aurobinda Routray, Ashok K. Pradhan, "*Detection of Arcing in Low Voltage Distribution Systems*", IEEE Region 10 Colloquium and the Third International Conference on Industrial and Information Systems, Paper ID 502, Kharagpur, India, Desember, 2008.
- [3] Tammy Gammon, John Matthews, "*The Historical Evolution of Arcing-Fault Models for Low-Voltage Systems*", IEEE.
- [4] J-M. Martel, M. Anheuser, F. Berger, "*A study of arcing fault in the low-voltage electrical installation*", IEEE, Germany.
- [5] Dogan Gokhan Ece, Francis M. Wells, Hakan G. Senel, "*Analysis And Detection of Arcing Faults In Low-voltage Electrical Power*", IEEE, USA, 1994.
- [6] Tim penyusun, "*Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000)*", Indonesia, 2000.
- [7] G. F. Moore, "*Electric Cables Handbook*", Blackwell Science Ltd, 1997.
- [8] Dimas Waluyo Jati, Dr. Ir. Hermawan DEA, "*Instalasi Saluran Kabel Tegangan Tinggi (Paper Insulation In Oil-Filled Cable) Inti Tunggal 150 KV Pada GIS Simpang Lima Pt. Pln (Persero) P3b Jb Region Jawa Tengah Dan Diy Upt Semarang*", Universitas Diponegoro, Semarang.
- [9] Peiyong Duan, Liping Xu, Xudong Ding, Chenguang Ning, Chenxu Duan, "*An Arc Fault Diagnostic Method for Voltage Lines Using the Difference of Wavelet Coefficients*", IEEE, Jinan, China, 2014.
- [10] John J. Shea, "Comparing 240 Vrms to 120 Vrms Series Arcing Faults in Residential Wire", IEEE, Pittsburgh, 2008.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari pengujian yang dilakukan untuk mensimulasikan *artificial short circuit* adalah sebagai berikut:

1. Gelombang arus busur api listrik naik secara signifikan tapi mempunyai durasi yang sangat cepat pada kabel dengan jumlah serabut 1 dan 3. Hal ini tidak memungkinkan peralatan pengaman yang ada pada sistem tegangan rendah untuk mendeteksi sebagai gangguan. Disisi lain pada kabel dengan jumlah serabut yang relatif banyak, gelombang arus naik dengan durasi yang cukup lama hingga konduktor yang saling bersentuhan melebur. Semakin kecil nilai arus saat terjadi fenomena bunga api maka akan semakin sulit pula peralatan pengaman yang ada pada instalasi tegangan rendah untuk mendeteksi adanya gangguan.
2. Daya yang dihasilkan saat terjadi bunga api listrik mengikuti arus yang terjadi saat fenomena tersebut berlangsung. Sehingga karakteristik daya yang dihasilkan juga tergantung dari karakteristik arusnya. Hal tersebut sesuai dengan persamaan dalam mencari nilai daya, dimana daya adalah nilai perkalian antara arus dan tegangan saat waktu yang sama.
3. Energi dihasilkan dari jumlah daya yang dihasilkan pada selang waktu tertentu. Sehingga karakteristik energi mengikuti karakteristik durasi terjadinya busur api listrik. Semakin lama durasi busur api listrik, maka akan semakin besar pula nilai energi yang dihasilkan oleh peristiwa busur api listrik tersebut. Karena durasi tergantung dari banyaknya serabut yang mengalami *short circuit* sehingga karakteristik daya juga bergantung dari banyaknya serabut yang mengalami *short circuit*.
4. Impedansi saluran bergantung dari jenis kabel, panjang kabel, dan luas penampang kabel yang digunakan. Impedansi saluran berpengaruh pada besarnya nilai peak arus saat terjadi fenomena bunga api listrik. Semakin besar nilai impedansi suatu saluran, maka nilai peak arus saat terjadi fenomena bunga api akan semakin kecil. Sedangkan jika nilai impedansi saluran yang digunakan kecil, maka nilai peak arus yang dihasilkan oleh fenomena bunga api menjadi besar.

5.2 Saran

Sistem yang digunakan untuk mensimulasikan *artificial short circuit* tidak sepenuhnya menggunakan sistem otomatis sehingga rawan adanya *human error*. Selain itu beban yang digunakan untuk mensimulasikan hanya berupa beban statis, sedangkan yang ada didalam sistem tegangan rendah juga terdapat beban dinamis yang berupa motor. Diharapkan untuk studi selanjutnya sistem yang digunakan untuk mensimulasikan *artificial short circuit* menggunakan sistem yang otomatis sehingga adanya *human error* dapat diminimalkan. Selain itu, beban yang digunakan sebaiknya berupa *lump load* agar saat mensimulasikan *artificial short circuit* lebih dekat dengan keadaan sistem tegangan rendah aslinya. Dengan begitu diharapkan hasil yang didapat lebih akurat, sesuai dengan peristiwa yang tidak disengaja.